

COMPARACIÓN DE TÉCNICAS DE FUSIÓN EN IMÁGENES DE ALTA RESOLUCIÓN ESPACIAL

FULGENCIO CÁNOVAS GARCÍA^{1,2} y FRANCISCO ALONSO SARRÍA¹

¹Instituto Universitario de Agua y Medio Ambiente. Universidad de Murcia.
Edificio D Campus de Espinardo, 30100 Murcia (España)

fulgencio.canovas@um.es alonsarp@um.es

²Departamento de Ingeniería Civil. Universidad de Cuenca.
Av. 12 de abril. Ciudadela Universitaria, Cuenca (Ecuador)

fulgencio.canovas@ucuenca.edu.ec

RESUMEN

En este artículo se comparan los resultados obtenidos con tres métodos de fusión en imágenes procedentes de sensores aerotransportados de muy alta resolución espacial: Análisis de Componentes Principales, *High Pass Filter* y *Gram-Schmidt*. Estos métodos se aplican a una imagen pancromática con resolución espacial de 45 cm y una multiespectral de 2 m y 4 bandas (B, G, R, Nir). Para evaluar los resultados se utilizan criterios cualitativos y cuantitativos, como el Índice Universal de Calidad de la Imagen. La principal conclusión es que el algoritmo de *Gram-Schmidt* es el que mejores resultados produce, seguido de *High Pass Filter* y, a bastante distancia, la fusión por Análisis de Componentes Principales.

Palabras clave: teledetección, fusión de imágenes, algoritmo *Gram-Schmidt*, Índice Universal de Calidad de la Imagen.

A COMPARISON OF FUSION TECHNIQUES IN HIGH RESOLUTION IMAGERY.

ABSTRACT

In this paper we compare the results obtained with three fusion techniques in very high spatial resolution imagery. The techniques are: Principal Component Analysis, High Pass Filter and Gram-Schmidt. These methods are applied to a spatial resolution panchromatic image of 45 cm and 2 m and a 4 bands (B, G, R, Nir) multispectral image. The results are evaluated using quantitative and qualitative criteria such as Universal Image Quality Index. The main conclusion is that the best results are obtained with the Gram-Schmidt algorithm, followed by High Pass Filter and finally the Principal Component Analysis whose results are quite worse than those of the others.

Keywords: Remote sensing, image fusion, Gram-Schmidt algorithm, Universal Image Quality Index.

1. Introducción

El término fusión de imágenes se refiere a las técnicas computacionales para la integración de imágenes o de información en formato ráster de distintas resoluciones espaciales, o que posean distinto tipo de información, con el objetivo de generar nuevas imágenes (Liu y Mason, 2009) aprovechando las ventajas particulares de los datos que se ponen en relación (Chuvienco Salinero, 2007). Lo que se pretende es mejorar la interpretabilidad de los datos, ya sea mejorando su calidad visual; facilitando la discriminación de ciertas categorías; aumentando la fiabilidad en la estimación de una determinada variable; o demostrando la solidez de un determinado método de análisis (Chuvienco Salinero, 2007).

La aparición de satélites capaces de captar imágenes de alta y muy alta resolución espacial ha llevado a prestar una atención creciente a estos algoritmos. Estos satélites suelen disponer de dos tipos de sensor, pancromático y multiespectral, teniendo generalmente el primero una resolución espacial mucho mayor que el segundo. La obtención en la misma imagen de la resolución espacial del pancromático, junto con la resolución espectral del multiespectral, se ha convertido en una cuestión de la que pueden obtenerse notables mejoras en la capacidad de fotointerpretación, así como en los resultados de una clasificación digital de imágenes.

Imágenes de diferentes sensores contienen características distintivas. La fusión de datos puede ser multisensor o multiresolución, para mejorar la interpretación visual y el análisis cuantitativo. En general, existen tres tipos de fusión de datos según Gong (1994) y Pohl y Van Genderen (1998): la de imágenes con diferente resolución espacial y espectral (Luo y Kay, 1989), la de imágenes de sensores que recolectan información diferente (Jiménez *et al.*, 1999; You *et al.*, 2007) y la fusión de datos para alimentar sistemas de decisión y análisis de imágenes que incorpora características del terreno capturado (Dai y Khorram, 1998; Benediktsson y Kanellopoulos, 1999).

Se han propuesto diversos algoritmos para lograr la fusión de una imagen multiespectral con otra pancromática de mayor resolución, como la transformación HPF (Pohl y Van Gendreen, 1998); transformación HIS (Choi, 2006; Silva *et al.*, 2007); análisis de componentes principales (Chavez y Kwarteng, 1989); diversas combinaciones aritméticas, como las transformaciones de Brovey (Gillespie *et al.*, 1987), *Synthetic Variable Ratio* o *Ratio Enhancement* (Rahman y Csaplovics, 2007) o la transformación de Gram Schmidt (Aiazzi *et al.*, 2007). Más recientemente se han utilizado transformaciones más sofisticadas, como las basadas en *wavelets* (Zhou *et al.*, 1998), redes neuronales (Zhang *et al.*, 2008) o filtros de Kalman (Quadri y Sidek, 2013). Una revisión reciente sobre el tema puede consultarse en Jiang *et al.* (2013).

En trabajos anteriores, Aiazzi *et al.* (2007) comparan la transformación *Gram-Schmidt* con otros métodos, concluyendo que es ésta la que ofrece mejores resultados. Ehlers *et al.* (2008), comparando la transformación de *Gram-Schmidt* con otros siete métodos, concluyen que ésta ofrece el segundo mejor resultado en términos de RMSE y el cuarto en cuanto a desviaciones por pixel entre la imagen original y la fusionada. Terminan aconsejando no utilizar los algoritmos más sencillos, salvo cuando el objetivo sea fusionar imágenes de un mismo sensor y fecha. Puesto que éste es el objetivo de este trabajo, se evalúan, con criterios cualitativos y cuantitativos, tres métodos sencillos. Se ha optado por la transformación HPF, el ACP y la transformación de *Gram-Schmidt* para determinar cuál es el que mejores resultados ofrece.

2. Algoritmos de fusión de imágenes

2.1. Análisis de componentes principales (ACP)

Consiste en utilizar como fuente de datos para un análisis de componentes principales las cuatro bandas del sensor multiespectral. La banda pancromática se ajusta para tener la misma media y varianza que el primer componente obtenido. La banda pancromática así ajustada se sustituye por el primer componente y se realiza la transformación inversa de los datos. La justificación para sustituir el primer componente ajustado es que estas dos capas, la pancromática y el primer componente, ofrecen información muy parecida. Este supuesto se acepta porque el primer componente absorbe la información que es común al conjunto de bandas multiespectrales, mientras que la información espectral individual de cada una de las bandas queda repartida en el resto de componentes, de los que este tipo de fusión no hace uso. En Pohl y Van Gendreen (1998) se puede consultar una descripción más detallada de la técnica aplicada a la fusión de imágenes.

Una descripción más detallada del procedimiento matemático se puede encontrar en numerosos manuales, tanto de teledetección (Chuvienco Salinero, 2007; Gao, 2009; Mather, 2004; Schowengerdt, 2007; Tso y Mather, 2009), como en otros más generales de matemáticas y análisis de datos (Aluja Banet y Morineau, 1999; Hair *et al.*, 1999; Peña, 2002).

2.2. Transformación HPF (High Pass Filter)

Este método consiste en añadir la información espacial de la banda pancromática a la información multiespectral de menor resolución espacial. Para esto, se aplica un filtro de paso alto en combinación con una operación de álgebra de mapas (Pohl y Van Gendreen, 1998).

El funcionamiento del algoritmo, descrito en Leica-Geosystems (2006), consta de cinco pasos:

1. Calcular el parámetro R a partir del tamaño del píxel de la capa pancromática y de la multiespectral:

$$R = \frac{t_{mis}}{t_{pan}}$$

donde t_{mis} es el tamaño del píxel de las bandas multiespectrales y t_{pan} es el tamaño del píxel de la banda pancromática.

2. Aplicación de un filtro de paso alto a la imagen pancromática; el tamaño de la ventana de filtrado es proporcional a R (tabla 1). Todos los elementos de la ventana de filtrado toman el valor -1, con la excepción del valor central. Existen tres posibilidades para este valor; el menor de los tres es el que se utiliza por defecto y es el que se ha empleado en este trabajo (tabla 1).

Tabla 1. Tamaño de la ventana de filtrado, valores centrales y de M en función de los valores de R (Leica-Geosystems, 2006).

Valor de R	Tamaño de la ventana	Valor central por defecto	Valores centrales opcionales	M máximo	M por defecto	M mínimo
$1 < R < 2,5$	5×5	24	28 32	0,3	0,25	0,2
$2,5 < R < 3,5$	7×7	48	56 64	0,65	0,5	0,35
$3,5 < R < 5,5$	9×9	80	93 106	0,65	0,5	0,35
$5,5 < R < 7,5$	11×11	120	150 180	1	0,65	0,5
$7,5 < R < 9,5$	13×13	168	210 252	1,4	1	0,65
$R > 9,5$	15×15	336	392 448	2	1,35	1

3. Remuestreo de la imagen multiespectral a la resolución espacial de la imagen filtrada.
4. Suma de la imagen filtrada a las capas multiespectrales. Pero antes, la imagen filtrada se pondera en función de la desviación típica de la imagen multiespectral y el valor de R , a este factor de ponderación se le denomina W :

$$W = \frac{\sigma_{mis}}{\sigma_{pan} - M}$$

donde σ_{mis} es la desviación típica de cada una de las bandas; σ_{pan} es la desviación típica de la imagen filtrada y M es un factor que determina la intensidad en la aplicación del filtro (tabla 1).

El cálculo para cada banda es:

$$P_{out} = P_m + P_{HPF} \cdot W$$

donde P_{out} es el píxel de salida de cada una de las bandas multiespectrales ya fusionadas; P_m es el píxel de entrada de cada una de las bandas multiespectrales originales y P_{HPF} es el píxel de la imagen filtrada.

5. Expansión lineal de los ND de la imagen multiespectral fusionada; esta operación *reescala* la imagen resultante, de forma que la media y la desviación típica coincida con las de la imagen original

2.3. Fusión *Gram-Schmidt*

En esta técnica la resolución espacial de las bandas multiespectrales se mejora por un proceso similar al de la fusión por PCA. La imagen pancromática se combina con el resto de bandas de menor resolución espacial mediante una transformación matemática de los datos originales.

La transformación *Gram-Schmidt* es una técnica común en álgebra lineal y análisis multivariante; en este caso se aplica con objeto de *ortogonalizar* las bandas de una imagen digital. Los detalles de esta transformación se pueden consultar en Clayton (1971) y Farebrother (1974). La *ortogonalización* de los datos elimina la información redundante que contienen, algo bastante acusado en las imágenes de satélite, especialmente en las bandas del espectro visible. En el caso de que exista una correlación perfecta entre las bandas de entrada, la *ortogonalización Gram-Schmidt* produciría una banda en la que todos los píxeles tendrían valor 0. En el caso más realista de que las correlaciones entre las bandas sean muy altas, el resultado será una imagen con valores muy bajos.

El funcionamiento del algoritmo aplicado a fusión de imágenes es:

1. Generación de la imagen pancromática simulada (P_{sim}) de la misma resolución espacial que la imagen multiespectral. Existen dos posibilidades, remuestreo de la imagen pancromática original o a partir de la media de las bandas multiespectrales. Esta última ofrece mejores resultados visuales y es la que se ha empleado en este trabajo. La nueva imagen se utiliza como la primera banda de la transformación *Gram-Schmidt*:

$$GS_1(i, j) = P_{sim}(i, j)$$

donde i y j son la fila y la columna, respectivamente, y GS_1 es la primera banda de la transformación *Gram-Schmidt*.

2. Para el uso de esta técnica en fusión de imágenes se lleva a cabo una pequeña modificación de la transformación *Gram-Schmidt* original: a cada píxel de la imagen que se pretende transformar se le resta la media de su banda antes de que se realice la *ortogonalización*. En la transformación *Gram-Schmidt* modificada, la banda GS_T se calcula a partir de las anteriores GS_{T-1} :

$$GS_T(i, j) = [B_T(i, j) - \mu_T] - \sum_{i=1}^{T-1} \phi(B_T, GS_i) \cdot GS_i(i, j)$$

donde T es el número de banda que se transforma, B es la banda original, μ_T es la media de la banda T y $\phi(B_T, GS_i)$ es:

$$\phi(B_T, GS_i) = \frac{\sigma(B_T, GS_i)}{\sigma_{GS_i}}$$

es decir, la covarianza de las bandas GS_i y la banda original B , entre la varianza de la banda GS_i .

3. A continuación, la imagen pancromática P se transforma de forma que su media μ_P y desviación típica σ_P coincidan con las de GS_I :

$$P_{Mod} = (P - gain) + bias$$

donde:

$$gain = \frac{\sigma_{GS_I}}{\sigma_P}$$

y

$$bias = \mu_{GS_I} - (gain \cdot \mu_P)$$

De esta forma, se preservan mejor los valores radiométricos de las imágenes de partida.

4. La imagen pancromática tipificada P_{Mod} se sustituye por la imagen GS_I y se realiza la transformación inversa de las bandas, es decir, de las imágenes *Gram-Schmidt* al espacio original de las bandas multiespectrales (Laben y Brower, 1998):

$$B_T(i, j) = [GS_T(i, j) + \mu_T] + \phi(BT, GS_I) - GS_I(i, j)$$

3. Materiales, datos y métodos

3.1 Área de estudio

La zona de estudio corresponde casi en su totalidad a la Unidad de Demanda Agraria (UDA) número 28, denominada cabecera del Argos, contemplada en el Plan Hidrológico de la cuenca del Segura, instrumento de planificación vigente aprobado por medio del RD 1664/1998 de 24 de julio. La UDA objeto de estudio se enmarca, con la excepción de una superficie de unas 600 ha, alrededor del núcleo urbano de Los Pinos, en la cuenca del río Argos, que es una cuenca característica del sureste español.

Comprende las superficies de riego situadas en la cabecera de la cuenca del Argos aguas arriba del embalse del mismo nombre y atendidas con recursos de origen mixto: aguas superficiales de acequias y manantiales; aguas subterráneas de los acuíferos Argos, Sima, Revolcadores-Serrata y Gavilán y residuales generadas en la zona. Los municipios sobre los que se asienta esta unidad son los de Caravaca de la Cruz y Cehegín (Confederación Hidrográfica del Segura, 1998). En esta Unidad de Demanda Agraria se pueden distinguir dos unidades paisajísticas bien diferenciadas.

La primera corresponde a la zona suroeste de la UDA, una superficie básicamente llana donde se encuentran las poblaciones de Archivel, Benablón, Barranda, Navales, Los Prados y Pinilla. Pertenece en su totalidad al término municipal de Caravaca de la Cruz. Podría calificarse

© Los autores

www.geo-focus.org

como uno de los *altiplanos del noroeste* de la región de Murcia (VV.AA., 2009). Es una gran superficie de relleno de materiales terciarios y cuaternarios, alojados entre sierras que, a diferencia de lo que ocurre en las denominadas cuencas murcianas (como la de Abanilla-Fortuna o la de Mula), apenas ha sido atacada por la erosión hídrica. De modo que los rellenos horizontales y las cubiertas detríticas cuaternarias, definen y dominan los dilatados perfiles de las planicies comarcales.

La segunda unidad puede denominarse *vega del Argos* (VV.AA., 2009) y se corresponde con la parte noreste de la UDA. Abarca desde la huerta de Caravaca hasta el embalse del Argos, con una orientación suroeste-noreste. Constituye un buen ejemplo de los regadíos tradicionales de las llanuras aluviales murcianas, con tierras próximas al lecho del río en los que abundan los frutales de regadío, tales como albaricoqueros y melocotoneros, los cuales, en los valles del Argos y del Quípar, alcanzan la mayor concentración regional (López Bermúdez *et al.*, 1986). Es una zona agrícola cuya imagen está condicionada por la atomización del parcelario, una alta densidad de vías de comunicación por carretera y el dominio de cultivos arbóreos. Además, integra los entornos urbanos de Caravaca y Cehegín.

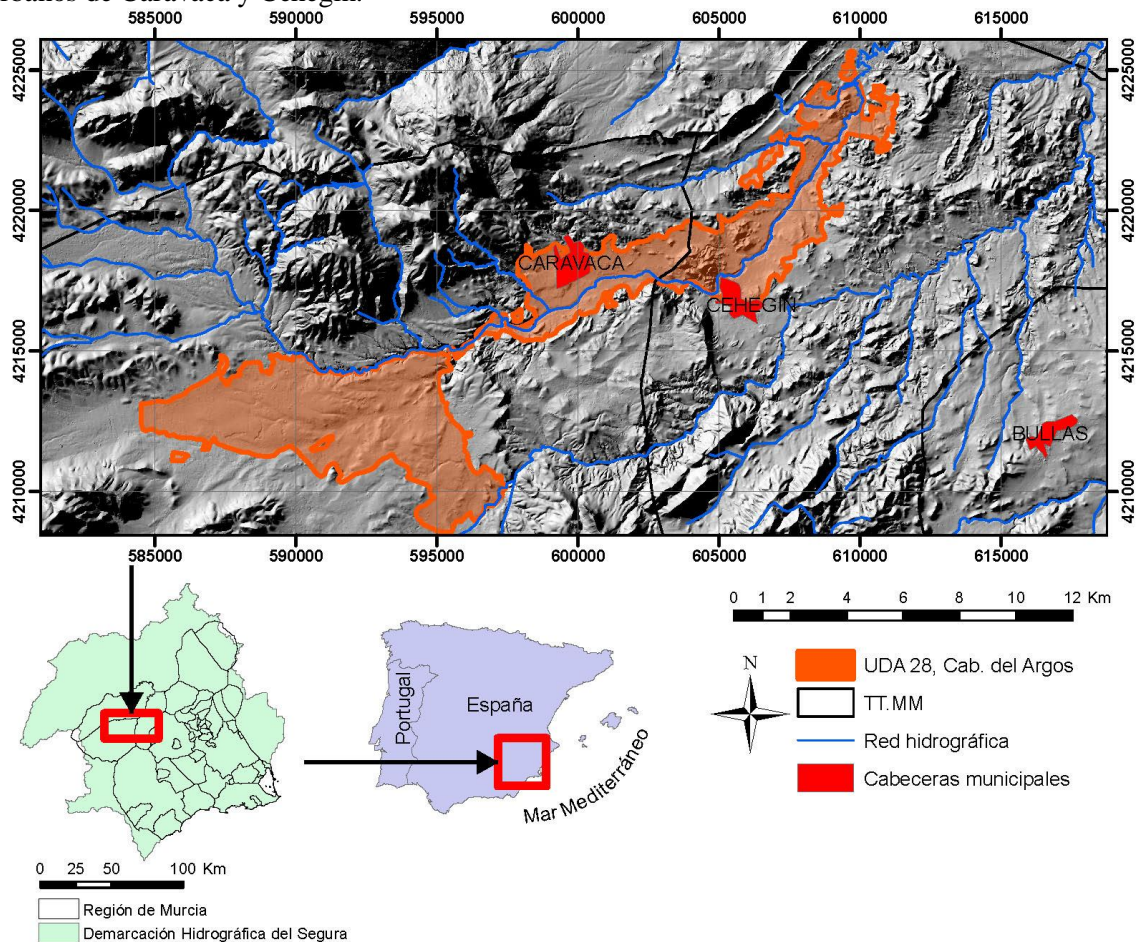


Figura 1. Mapa de situación de la UDA n° 28, vega del Argos. La imagen de fondo corresponde a un mapa de sombreado del relieve extraído de un MDT del IGN.

3.2 Materiales

La mayor parte de la información utilizada en esta investigación se ha obtenido del proyecto Natmur-08. Es una asistencia técnica contratada por la administración regional murciana, cuyos resultados se distribuyen con licencia *Creative Commons*, con intención de cubrir las necesidades de ortoimágenes actualizadas para la gestión medioambiental. Ya que, aun existiendo ortoimágenes de características similares posteriores, iniciado el año 2008, únicamente se disponía de forma accesible a cualquier ciudadano o administración interesada del ortomosaico del *QuickBird 2003* (también producido por la entonces Dirección General del Medio Natural de la CARM).

El proyecto Natmur-08 ha consistido en la realización de un vuelo fotogramétrico digital con sensores pancromático y multiespectral (bandas R, G, B, Nir) y un levantamiento LiDAR, sobre una superficie total de 12.870 km². El sistema de referencia básico de todo el proyecto es ETRS89, apoyado en la red REGENTE a través de las estaciones permanentes GNSS Meristemum.

Las imágenes empleadas proceden de dos sensores, uno pancromático y otro multiespectral (bandas R, G, B y Nir). El primero tiene muy alta resolución espacial, 0,45 m, pero muy baja resolución espectral, ya que solo posee un canal que capta la reflectividad en un intervalo muy ancho de longitud de onda (desde los 0,4 a los 0,85 μ m). Con respecto a las bandas del multiespectral, la situación es justo la opuesta: poseen una resolución espacial muy inferior (2 m) y mejor resolución espectral (4 bandas más estrechas). Ambos sensores tienen una resolución radiométrica de 12 bits.

El proyecto Natmur-08 se licitó por la entonces denominada Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio a la empresa STEREOCARTO S.A. Desde la dirección técnica de este proyecto se requería la máxima homogeneidad, complementariedad y aplicabilidad de los resultados, por lo que se definió técnicamente siguiendo el modelo que, con carácter general, ha establecido el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea Español para las ortoimágenes de 0,5 m de resolución espacial.

3.3 Metodología

Los tres tipos de fusión se han llevado a cabo por hojas 1:5.000 de la serie Mapa Topográfico Regional de Murcia; posteriormente se han unido en un mosaico sin aplicar ninguna corrección que modifique los valores resultado de la fusión. La razón por la que se ha dividido la zona en áreas rectangulares de menor extensión es que la fusión por PCA no funciona bien para todo el área de estudio. Con el objetivo de que los resultados sean comparables, los otros dos métodos de fusión se han implementado de la misma forma: fusión por hojas y unión posterior de toda la escena.

A la hora de evaluar los tres métodos de fusión, se ha realizado una interpretación visual de los resultados, atendiendo principalmente al comportamiento de los bordes; de la textura, tanto de parcela como de existencia de texturas veteadas; existencia de efecto mosaico y existencia de

colores anómalos. Los resultados se juzgan siguiendo una escala cualitativa de 1 (muy malo) a 5 (muy bueno).

A esta valoración cualitativa le acompaña una cuantitativa con el Índice Universal de Calidad de la Imagen (Wang y Bovik, 2002), que se obtiene a partir de las medias, varianzas y covarianzas de las dos imágenes:

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y} - \frac{2\bar{x}\bar{y}}{\bar{x}^2 + \bar{y}^2} - \frac{2\sigma_x \sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_y^2}$$

donde x es la imagen original e y la imagen que se quiere evaluar.

El rango de Q es de -1 a 1. El valor 1 indica el mejor resultado, lo que significaría que $y = x$, es decir, que las dos imágenes son idénticas.

El primer factor de la ecuación es el coeficiente de correlación entre x e y . Mide el grado de ajuste lineal entre las dos imágenes: 1 en el caso de que sean la misma y 0 en el caso de que no exista correlación. El segundo factor compara las medias de las dos imágenes; el rango de valores posibles está entre 0 y 1. El tercer y último factor informa sobre la variabilidad espectral de las dos imágenes, asociando esta magnitud al contraste existente en la imagen. En este caso, el rango también está entre 0 y 1.

El primer paso consiste en aplicar un remuestreo de la imagen fusionada para que tenga la misma resolución espacial que la imagen multiespectral original. Después se juntan las 8 bandas en una sola imagen y se comparan con el Índice Universal de Calidad de la Imagen. Para esto tan solo es necesario calcular las estadísticas básicas y la matriz de correlaciones.

Con respecto a la valoración cuantitativa de la calidad de la fusión, hay que tener en cuenta que este índice ha sido pensado para aplicaciones muy diferentes, como es la compresión de imágenes. Sin embargo, en fusión de imágenes es tan importante comprobar que no se ha producido una alteración significativa de los valores radiométricos originales (medidos en este caso con la media, desviación típica y coeficiente de correlación), como que el resultado de la fusión tenga una calidad visual adecuada: que los objetos que componen la imagen se parezcan a lo que, se supone, tienen que parecerse y que el aumento de detalle de las imágenes corresponda al aumento de la resolución espacial conseguido.

El cálculo de Q se ha aplicado al conjunto del área de estudio, pero, para tener una aproximación más cercana a la temática específica de la investigación, también se ha aplicado sobre un conjunto de áreas seleccionadas por un muestreo aleatorio de tipo estratificado. Se han seleccionado aleatoriamente 100 polígonos del tipo arbóreo denso, arbóreo no denso, herbáceo, tierras de labor y superficie artificial, más 44 invernaderos. En total, 544 polígonos. La distribución espacial de la muestra (ver figura 2) se corresponde con la distribución de las coberturas, según se ha apreciado en el trabajo de campo realizado en el ámbito de esta investigación.

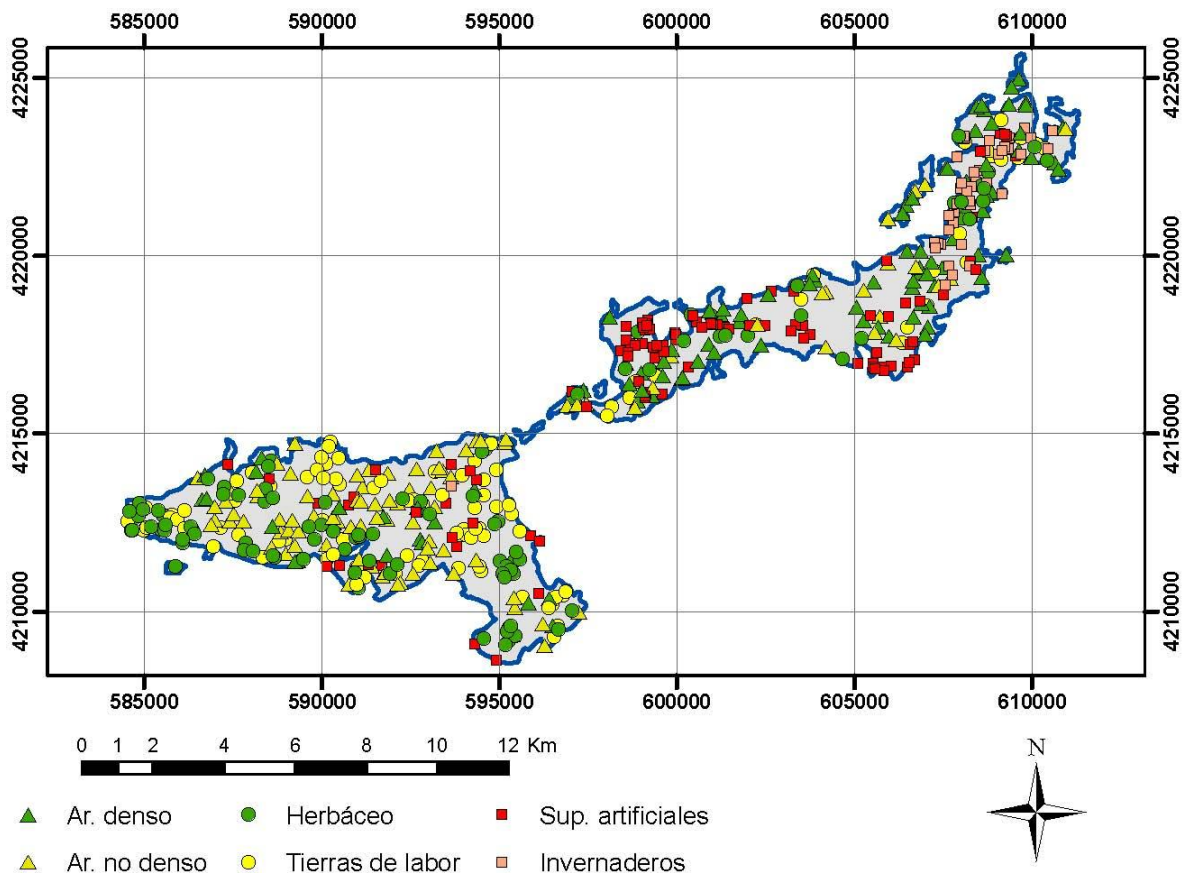


Figura 2. Distribución espacial de las áreas de muestreo de la fusión de imágenes.

4. Resultados y discusión

Una comparación visual de los resultados (figuras 3 a 8) muestra que con los tres métodos utilizados se consigue una mejora visual significativa respecto a la imagen sin fusionar. En todas las imágenes se aprecia un incremento en la capacidad de identificación de texturas a nivel de parcela, algo muy importante en la clasificación de imágenes de muy alta resolución espacial. La delimitación de los bordes de parcela se mejora también en todos los casos.

Estas figuras (figuras 3 a 8) muestran los resultados obtenidos con los tres métodos, junto a la imagen original para parcelas de cereal, almendro, usos diversos, incluyendo invernaderos, frutales de regadío, eriales y tierras de labor. La figura 8 muestra, además, un ejemplo de los resultados obtenidos al yuxtaponer los resultados de dos hojas diferentes del Mapa Topográfico Regional 1:5000.

Cánovas García, F. y Alonso Sarría, F. (2014): "Comparación de técnicas de fusión en imágenes de alta resolución espacial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 144-162. ISSN: 1578-5157



Figura 3. Imagen original (1); fusión con ACP (2); fusión con *High Pass Filter* (3) y fusión con el método de *Gram-Smith* (4) en parcelas de cereal.

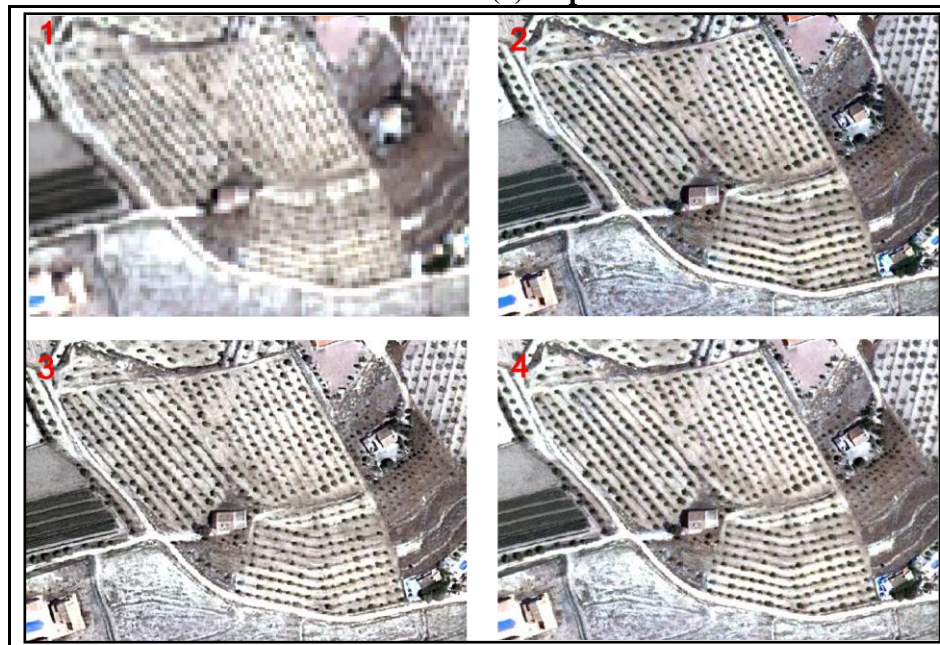


Figura 4. Imagen original (1); fusión con ACP (2); fusión con *High Pass Filter* (3) y fusión con el método de *Gram-Smith* (4) en parcelas de almendro.

Cánovas García, F. y Alonso Sarría, F. (2014): "Comparación de técnicas de fusión en imágenes de alta resolución espacial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 144-162. ISSN: 1578-5157

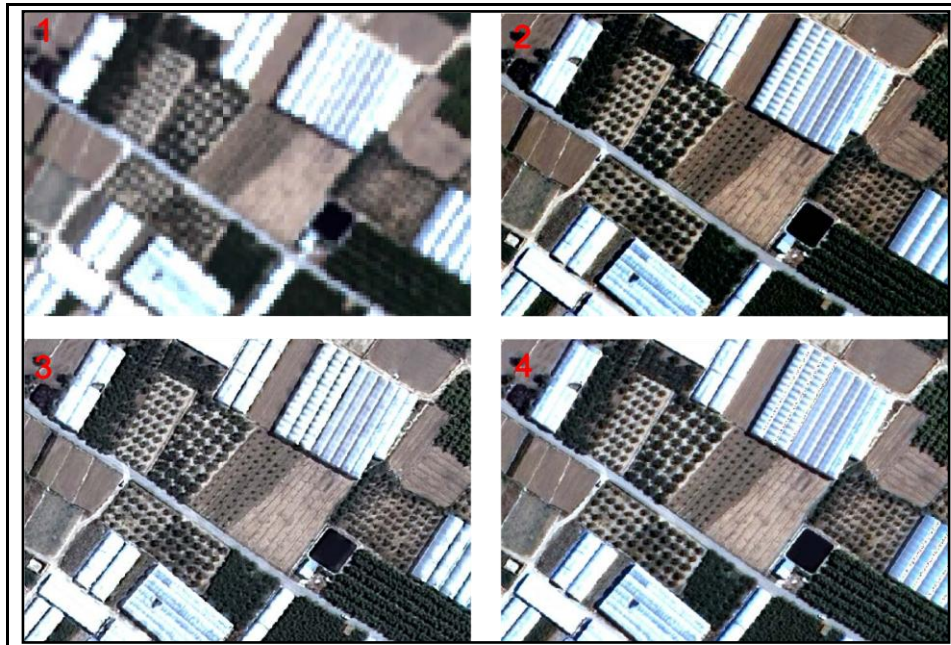


Figura 5. Imagen original (1); fusión con ACP (2); fusión con *High Pass Filter* (3) y fusión con el método de *Gram-Smith* (4) en parcelas de diversos usos mezcladas con invernaderos.



Figura 6. Imagen original (1); fusión con ACP (2); fusión con *High Pass Filter* (3) y fusión con el método de *Gram-Smith* (4) en parcelas de frutales de regadío.

Cánovas García, F. y Alonso Sarría, F. (2014): "Comparación de técnicas de fusión en imágenes de alta resolución espacial", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p. 144-162. ISSN: 1578-5157

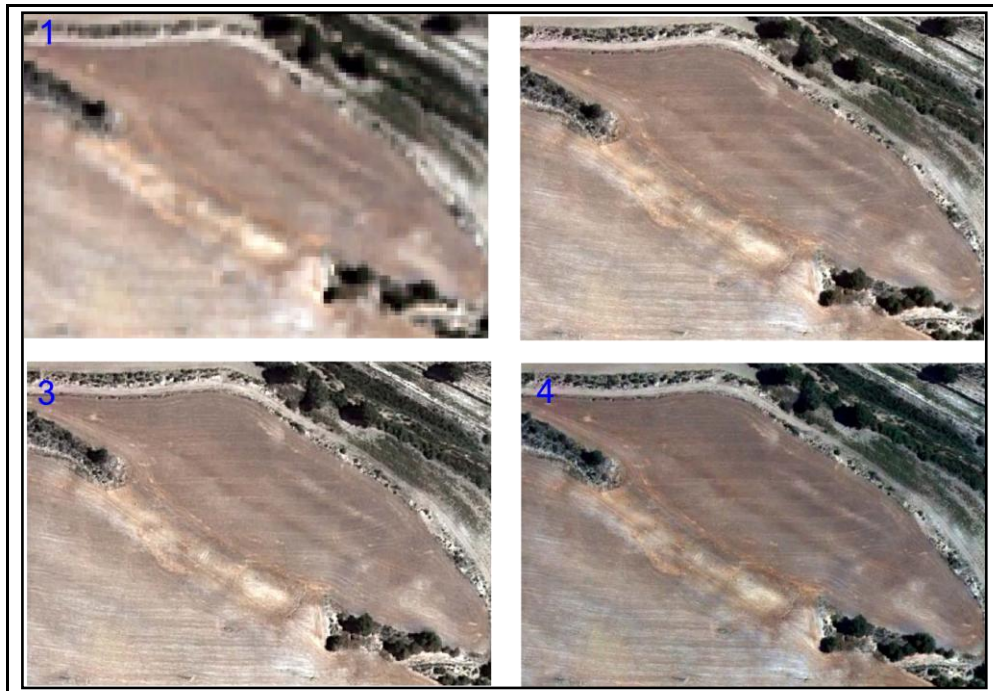


Figura 7. Imagen original (1); fusión con ACP (2); fusión con *High Pass Filter* (3) y fusión con el método de *Gram-Smith* (4) en parcelas de eriales.

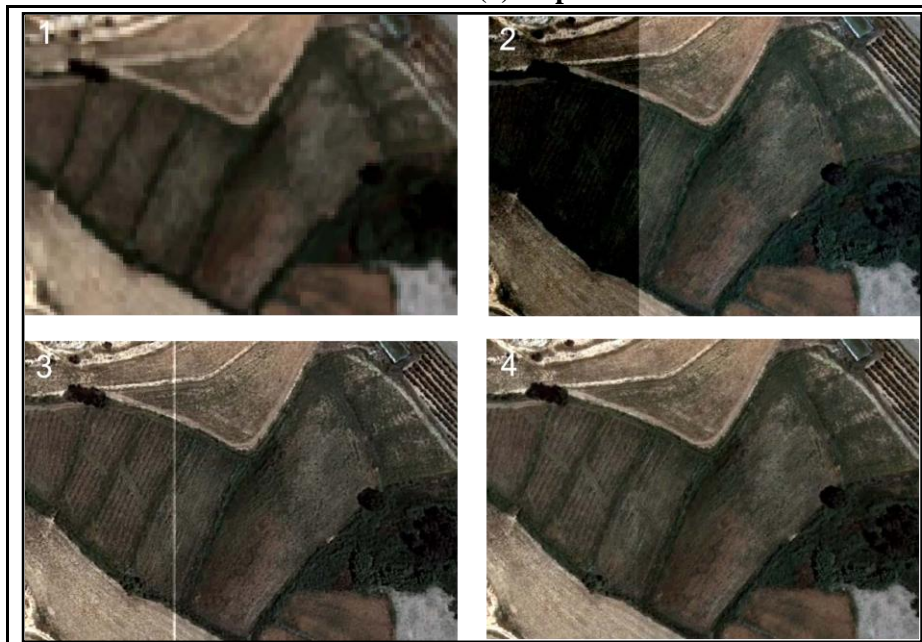


Figura 8. Imagen original (1); fusión con ACP (2); fusión con *High Pass Filter* (3) y fusión con el método de *Gram-Smith* (4) en parcelas de labor.

Los peores resultados visuales se obtienen con la fusión por ACP. Si bien a nivel de parcela los resultados son muy buenos, cuando se observa la escena en su conjunto aparece el factor limitante de esta técnica: el efecto mosaico (figura 8).

Los otros dos métodos proporcionan resultados bastante satisfactorios. La fusión *Hight Pass Filter* también presenta problemas de efecto mosaico, sin embargo, estos no son tan acusados como en el caso anterior. La anomalía en los niveles digitales de la imagen se produce solamente en la estrecha franja que une las hojas. La fusión *Gram-Schmidt* no tiene este problema, no se perciben diferencias acusadas en los niveles digitales de las zonas de contacto entre hojas.

La fusión *Gram-Schmidt* proporciona unos resultados sensiblemente mejores que los otros dos métodos, especialmente si la comparamos con el ACP. La mejora con respecto a la fusión *High Pass Filter* no es tan acusada, sin embargo, una inspección más detallada de las imágenes nos permite comprobar como la fusión *Gram-Schmidt* proporciona unas imágenes más naturales. También se podría decir que las imágenes son más realistas. La fusión *Gram-Schmidt* proporciona imágenes con un grado de contraste alto, mayor especialmente que las de la fusión *Hight Pass Filter*. El principal problema que presenta la transformación *Gram-Schmidt* es la existencia de valores anómalos en las zonas con reflectividades muy altas (figura 5), como las zonas de invernaderos o los techos de algunas naves industriales. A pesar de esto, la fusión *Gram-Schmidt* proporciona los mejores resultados de cara a una interpretación visual.

En la tabla 2 se presenta una valoración cualitativa de las seis imágenes que han sido presentadas como ejemplos, atendiendo a los cinco criterios de este tipo. En cuanto a la textura, los mejores resultados se producen con el método de *Gram-Schmidt*, seguido de cerca por HPF y ACP. En cuanto a la nitidez de los bordes, tanto el algoritmo de *Gram-Schmidt* como el ACP obtienen resultados casi perfectos, excepto en la figura 8 donde ACP obtiene resultados muy pobres. Las texturas veteadas se reproducen muy bien en los tres casos. La aparición de colores anómalos es el punto más débil del algoritmo de *Gram-Schmidt*, especialmente en superficies muy reflectantes (figuras 5 y 6). Finalmente, sólo el algoritmo de *Gram-Schmidt* presenta resultados razonables al yuxtaponer imágenes fusionadas por separado.

Para la evaluación cuantitativa de los resultados se ha aplicado el Índice de Calidad Universal de la Imagen, tal y como se ha formulado en la metodología que, como se ha dicho, está compuesto por tres parámetros o estadísticos: la media, la desviación típica y el coeficiente de correlación. La tabla 3 muestra los resultados respecto a la conservación de los valores originales de la imagen multiespectral. La fusión *Gram-Schmidt* y la *Hight Pass Filter* arrojan valores prácticamente iguales, la fusión por PCA, sin embargo, ofrece resultados bastante inferiores.

Si nos centramos en los diferentes tipos de cobertura, parece existir cierta estabilidad: los resultados más elevados se dan en las parcelas de tierras de labor con los métodos *Gram-Schmidt* y *Hight Pass Filter* y de los tres mejores con la fusión por PCA. Los peores resultados se obtienen para las parcelas de arbóreo denso en los tres métodos. De este análisis se desprende que la fusión *Gram-Schmidt* y *Hight Pass Filter* ofrecen resultados similares y aceptables.

Tabla 2. Valoración cualitativa de algunas características visuales de las imágenes fusionadas (figuras 3 a 8): 1=muy malo, 2=malo, 3=aceptable, 4=bueno, 5=muy bueno.

	ACP	HPF	GS
<i>Textura en parcela</i>			
Figura 3	4	5	5
Figura 4	5	5	5
Figura 5	4	4	4
Figura 6	5	4	5
Figura 7	5	5	5
Figura 8	3	4	5
<i>Nitidez de bordes</i>			
Figura 3	5	5	5
Figura 4	5	5	5
Figura 5	5	4	5
Figura 6	5	3	5
Figura 7	5	5	5
Figura 8	2	5	5
<i>Texturas veteadas</i>			
Figura 3	5	4	5
Figura 4	5	5	5
Figura 5	5	4	5
Figura 6	4	4	4
Figura 7	5	5	5
Figura 8	4	4	5
<i>Colores anómalos</i>			
Figura 3	5	5	5
Figura 4	5	5	5
Figura 5	4	4	3
Figura 6	5	5	2
Figura 7	5	5	5
Figura 8	5	5	5
<i>Efecto mosaico</i>			
Figura 3	-	-	-
Figura 4	-	-	-
Figura 5	-	-	-
Figura 6	-	-	-
Figura 7	-	-	-
Figura 8	1	2	4

Tabla 3. Resultados del índice universal de calidad de la imagen para los diferentes métodos de fusión utilizados.

USO	ACP				Filtro de paso alto				Gram-Smidt			
	r	m	s	Q	r	m	s	Q	r	m	s	Q
Banda 1	0,85	0,87	0,98	0,72	0,90	1,00	1,00	0,90	0,90	1,00	1,00	0,90
Banda 2	0,86	0,89	0,98	0,75	0,90	1,00	1,00	0,90	0,89	1,00	1,00	0,89
Banda 3	0,87	0,91	0,99	0,78	0,91	1,00	1,00	0,91	0,90	1,00	1,00	0,90
Banda 4	0,86	0,97	0,99	0,83	0,89	1,00	1,00	0,89	0,89	1,00	1,00	0,89
Arbolado denso												
Banda 1	0,72	0,81	1,00	0,59	0,78	1,00	0,98	0,76	0,78	1,00	0,98	0,76
Banda 2	0,69	0,88	1,00	0,61	0,76	1,00	0,98	0,74	0,75	1,00	0,98	0,74
Banda 3	0,68	0,91	1,00	0,62	0,75	1,00	0,97	0,72	0,74	1,00	0,98	0,73
Banda 4	0,77	0,98	1,00	0,76	0,77	1,00	0,99	0,76	0,80	1,00	1,00	0,80
Arbolado no denso												
Banda 1	0,81	0,86	1,00	0,69	0,84	1,00	0,99	0,83	0,81	1,00	0,99	0,81
Banda 2	0,82	0,88	1,00	0,72	0,85	1,00	0,99	0,84	0,82	1,00	1,00	0,82
Banda 3	0,82	0,90	1,00	0,73	0,84	1,00	0,99	0,84	0,82	1,00	1,00	0,82
Banda 4	0,85	0,96	1,00	0,81	0,84	1,00	1,00	0,83	0,83	1,00	1,00	0,83
Herbáceo												
Banda 1	0,65	0,82	1,00	0,53	0,88	1,00	1,00	0,87	0,89	1,00	1,00	0,89
Banda 2	0,58	0,88	1,00	0,51	0,84	1,00	1,00	0,84	0,86	1,00	1,00	0,85
Banda 3	0,57	0,90	1,00	0,51	0,82	1,00	1,00	0,82	0,84	1,00	1,00	0,84
Banda 4	0,80	0,98	0,99	0,77	0,87	1,00	1,00	0,87	0,90	1,00	1,00	0,90
Tierras de labor												
Banda 1	0,81	0,89	0,98	0,70	0,91	1,00	1,00	0,91	0,91	1,00	1,00	0,91
Banda 2	0,84	0,89	0,97	0,73	0,92	1,00	1,00	0,92	0,91	1,00	1,00	0,91
Banda 3	0,86	0,90	0,98	0,76	0,92	1,00	1,00	0,92	0,92	1,00	1,00	0,92
Banda 4	0,84	0,96	0,99	0,80	0,91	1,00	1,00	0,91	0,92	1,00	1,00	0,92
Superficies artificiales												
Banda 1	0,80	0,91	0,99	0,72	0,83	1,00	0,99	0,83	0,82	1,00	1,00	0,82
Banda 2	0,84	0,93	0,99	0,77	0,85	1,00	1,00	0,85	0,84	1,00	1,00	0,84
Banda 3	0,87	0,94	0,99	0,82	0,87	1,00	1,00	0,87	0,86	1,00	1,00	0,86
Banda 4	0,84	0,96	1,00	0,81	0,83	1,00	1,00	0,83	0,84	1,00	1,00	0,84
Invernaderos												
Banda 1	0,84	0,89	0,99	0,74	0,87	1,00	1,00	0,87	0,83	1,00	1,00	0,83
Banda 2	0,88	0,93	0,99	0,81	0,90	1,00	1,00	0,90	0,88	1,00	1,00	0,88
Banda 3	0,91	0,95	0,99	0,86	0,91	1,00	1,00	0,91	0,91	1,00	1,00	0,91
Banda 4	0,84	0,95	1,00	0,80	0,85	1,00	1,00	0,85	0,85	1,00	1,00	0,84

Desde el punto de vista de la interpretación visual, la fusión *Gram-Schmidt* ofrece resultados algo más convincentes.

5. Conclusiones

La principal conclusión que puede resaltarse es que el algoritmo de *Gram-Schmidt* es con el que mejores resultados se obtiene. Con esto no se pretende decir que el algoritmo *Gram-Schmidt* sea mejor que el resto, tan solo que, con estas imágenes en concreto y para el área de estudio seleccionada, está técnica funciona mejor.

Por otra parte, las imágenes generadas son de suficiente calidad como para aplicarles otras técnicas de teledetección, como la segmentación de imágenes u otras, como clasificaciones de tipo supervisado y no supervisado.

Es conveniente continuar con la elaboración de estudios de este tipo en otras áreas de estudio y con otro tipo de imágenes, ya que el tremendo desarrollo de la fotogrametría digital y de la ciencia aeroespacial, sin duda, van a tener como resultado un incremento de la disponibilidad de imágenes de teledetección y, hoy por hoy, éstas son tomadas con dos sensores, el pancromático y el multiespectral, de forma que solo va a ser posible obtener la resolución espacial del primero y la resolución espectral del segundo mediante el uso de técnicas de fusión de imágenes. En este sentido, cualquier investigación que aporte información sobre los resultados que es previsible obtener será interesante, sobre todo si la metodología está bien expuesta y es perfectamente reproducible.

Como trabajos futuros nos proponemos la creación de módulos para GRASS para la fusión de imágenes con el algoritmo *Gram-Schmidt* y *Hight Pass Filter*, ya que solo han podido utilizarse mediante programas de tipo privativo: ERDAS, para la fusión *Hight Pass Filter*, y ENVI, para la fusión *Gram-Schmidt S*.

Agradecimientos

Este trabajo se ha realizado en el marco del proyecto 15233/PI/10, financiado por la Fundación Séneca. A ella nuestro agradecimiento. Ha sido también posible gracias a una beca de la Fundación Cajamurcia.

Nos gustaría agradecer al Servicio de Integración y Gestión Ambiental de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia su ayuda al proporcionarnos las fotografías aéreas empleadas.

Además, este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación del Gobierno de Ecuador.

Referencias bibliográficas

Aiazzi, B.; Baronti, S. y Selva, M. (2007): "A MS + Pan image fusion by an enhanced Gram-Schmidt spectral sharpening New Developments and Challenges", en Z. Bochenek (ed.): *Remote Sensing*, Millpress, Rotterdam.

Aluja Banet, T. y Morineau, A. (1999): *Aprender de los datos: el análisis de componentes principales. Una aproximación desde el Data Mining*. Barcelona, EUB.

Benediktsson, J.A. y Kanellopoulos, I. (1999): "Classification of multisource and hyperspectral data based on decision fusion", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, pp. 1367-1377.

Chavez, P.S. y Kwarteng, A.Y. (1989): "Extracting spectral contrast in Landsat Thematic Mapper image data using selective principle component analysis," *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 55, 3, pp. 339-348.

Choi, M. (2006): "A new intensity-hue-saturation fusion approach to image fusion with a tradeoff parameter", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44, 6, pp. 1672-1682.

Chuvieco Salinero, E. (2007): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona, Ariel, 3ª edición.

Clayton, D.G. (1971): "Algorithm AS 46: Gram-Schmidt Orthogonalization", *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 20, 3, pp. 335-338.

Confederación Hidrográfica del Segura (1998): *Plan Hidrológico de la cuenca del Segura*. Murcia, Informe técnico.

Dai, X. y Khorram, S. (1998): "A hierarchical methodology framework for multisource data fusion in vegetation classification", *International Journal in Remote Sensing*, 19, pp. 3697-3711.

Ehlers, M.; Klonus, S. y Åstrand, P.J. (2008): "Quality assessment for multi-sensor multi-date image fusion", *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37,B4, pp. 499-505.

Farebrother, R.W. (1974): "Algorithm AS 79: Gram-Schmidt Regression", *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 23, 3, pp. 470-476.

Gillespie, A.R.; Kahle, A.B. y Walker, R.E. (1987): "Color enhancement of highly correlated images—II. Channel ratio and 'chromaticity' transformation techniques", *Remote Sens. Environ.*, 22, pp. 343-365.

Gao H. (2009): *Digital Analysis of Remotely Sensed Imagery*. New York, McGraw-Hill.

Gong, P. (1994): "Integrated analysis of spatial data from multiple sources: An overview", *Canadian Journal of Remote Sensing*, 20.

Hair, J.F.; Anderson, R.E.; Tatham, R.L. y Black, W.C. (1999): *Análisis multivariante*. Madrid, Prentice Hall, 5ª edición.

Jiang, D.; Zhuang, D. y Huang, Y. (2013) "Investigation of Image Fusion for Remote Sensing Application", en Qiguang Miao (ed.): *New Advances in Image Fusion*, ISBN 978-953-51-1206-8, bajo licencia CC BY 3.0.

Jimenez, L. O.; Morales-Morell, A. y Creus, A. (1999): "Classification of hyperdimensional data based on feature and decision fusion approaches using projection pursuit, majority voting, and neural networks", *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37, pp. 1360-1366.

Laben, C.A. y Brower, B.V. (1998): *Process for Enhancing the Spatial Resolution of Multispectral Imagery Using Pan-Sharpning*. Informe técnico, United States Patent 6.011.875.

Leica-Geosystems (2006): *ERDAS Imagine 9.1* Documentación online.

Liu, J.G. y Mason, P.J. (2009): *Essential Image Processing and GIS for Remote Sensing*. Singapore, Wiley-Blackwell.

Luo, R. C. y Kay, M. G. (1989): "Multisensor integration and fusion for intelligent systems", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 19, pp. 901-931.

Mather, P.M. (2004): *Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction*. Chichester, Wiley, 3ª edición.

López Bermúdez, F.; Calvo García-Tornel, F. y Morales Gil, A. (1986): *Geografía de la Región de Murcia*. Murcia, Ketres.

Peña, D. (2002): *Análisis de datos multivariantes*. Madrid, Mg Graw-Hill.

Pohl, C. y Van Gendreen, J.L. (1998): "Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications", *International Journal of Remote Sensing*, 19, 5, pp. 823-854.

Quadri, S.A. y Sidek, O. (2013): "Pixel-Level Image Fusion using Kalman Algorithm", *International Journal of Signal Processing, Image Processing and Pattern Recognition*, 6, 2, pp. 75-86.

Rahman, M.M. y Csaplovics, E. (2007): "Examination of image fusion using synthetic variable ratio (SVR) technique", *International Journal of Remote Sensing*, 28, 15, pp. 3413-3424.

Schowengerdt, R.A. (2007): *Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing*. London, Elsevier, 3ª edición.

Silva, F.C.; Dutra, L.V.; Fonseca, L.M.G. y Korting, T.S. (2007): "Urban Remote Sensing Image Enhancement Using a Generalized IHS Fusion Technique", *Proceedings of the Symposium on Radio Wave Propagation and Remote Sensing*, Rio de Janeiro, Brazil.

Tso, B. y Mather, P.M. (2009): *Classification Methods for Remotely Sensed Data*. London, Taylor & Francis, 2ª edición.

VV.AA (2009): *Atlas de los paisajes de la Región de Murcia*. Murcia, La Verdad y Consejería de Obras Públicas y Ordenación del Territorio.

Wang, Z. y Bovik, A.C. (2002): "A Universal Image Quality Index", *IEEE Signal Processing Letters*, 9, 3, pp. 81-84.

You, L.; Wood, S. y Wood-Sichra, U. (2009): "Generating plausible crop distribution maps for Sub-Saharan Africa using a spatially disaggregated data fusion and optimization approach", *Agricultural System*, 99, pp. 126-40.

Zhang, H.; Sun, X.N.; Zhao, L.; Liu, L. (2008): "Image fusion algorithm using RBF neural networks", *Lecture Notes in Computer Science*, 9, pp. 417-424.

Zhou, J.; Civco, D.L. y Silander, J.A. (1998): "A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data", *International Journal of Remote Sensing*, 19, 4, pp. 743-757.